

日本国特許庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出願年月日
Date of Application: 2003年 2月20日

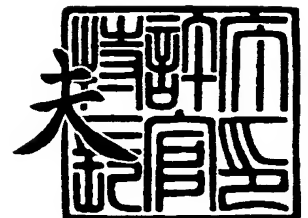
出願番号
Application Number: 特願2003-042916
[ST. 10/C]: [JP2003-042916]

出願人
Applicant(s): 三菱電機株式会社

2004年 1月14日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

今井康夫



出証番号 出証特2003-3111590

【書類名】 特許願

【整理番号】 543612JP01

【提出日】 平成15年 2月20日

【あて先】 特許庁長官 殿

【国際特許分類】 G05D 3/12

【発明者】

【住所又は居所】 東京都千代田区丸の内二丁目 2 番 3 号 三菱電機株式会
社内

【氏名】 長岡 弘太郎

【発明者】

【住所又は居所】 東京都千代田区丸の内二丁目 2 番 3 号 三菱電機株式会
社内

【氏名】 佐藤 智典

【発明者】

【住所又は居所】 東京都千代田区丸の内二丁目 2 番 3 号 三菱電機株式会
社内

【氏名】 池田 英俊

【発明者】

【住所又は居所】 東京都千代田区丸の内二丁目 2 番 3 号 三菱電機株式会
社内

【氏名】 高橋 悌史

【特許出願人】

【識別番号】 000006013

【氏名又は名称】 三菱電機株式会社

【代理人】

【識別番号】 100066474

【弁理士】

【氏名又は名称】 田澤 博昭



【選任した代理人】

【識別番号】 100088605

【弁理士】

【氏名又は名称】 加藤 公延

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 020640

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【プルーフの要否】 要



【書類名】 明細書

【発明の名称】 サーボ制御装置

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 位置指令信号を補正する F I R フィルタ部と、

上記 F I R フィルタ部により補正された位置指令信号から、駆動対象機械の特性に対応した所定の周波数成分を減衰して、位置、速度およびトルクの各フィードフォワード信号を演算する機械特性補償部と、

上記機械特性補償部により演算された位置、速度およびトルクの各フィードフォワード信号に応じて上記駆動対象機械を駆動するフィードバック補償部とを備えたサーボ制御装置。

【請求項 2】 機械特性補償部は、

位置指令信号から駆動対象機械の反共振周波数成分を減衰して、位置のフィードフォワード信号を演算する位置指令演算器と、

位置指令信号を微分する微分器と、

上記微分器による演算値から上記駆動対象機械の反共振周波数成分を減衰して、速度のフィードフォワード信号を演算する速度指令演算器と、

上記微分器による演算値を微分すると共に上記駆動対象機械の総イナーシャを乗算する演算器と、

上記演算器による演算値から上記駆動対象機械の共振周波数成分を減衰して、トルクのフィードフォワード信号を演算するトルク指令演算器とを備えたことを特徴とする請求項 1 記載のサーボ制御装置。

【請求項 3】 機械特性補償部は、

駆動対象機械の減衰特性による影響を低減するように時定数がその駆動対象機械の減衰定数、反共振周波数および負荷イナーシャに応じて設定され、位置指令信号を補正する 1 次遅れフィルタと、

上記 1 次遅れフィルタにより補正された位置指令信号から上記駆動対象機械の減衰特性を考慮した反共振周波数成分を減衰して、位置のフィードフォワード信号を演算する位置指令演算器と、

上記 1 次遅れフィルタにより補正された位置指令信号を微分する微分器と、



上記微分器による演算値から上記駆動対象機械の減衰特性を考慮した反共振周波数成分を減衰して、速度のフィードフォワード信号を演算する速度指令演算器と、

上記微分器による演算値を微分すると共に上記駆動対象機械の総イナーシャを乗算する演算器と、

上記演算器による演算値から上記駆動対象機械の減衰特性を考慮した共振周波数成分を減衰して、トルクのフィードフォワード信号を演算するトルク指令演算器とを備えたことを特徴とする請求項 1 記載のサーボ制御装置。

【請求項 4】 F I R フィルタ部は、

2 段以上の移動平均フィルタからなり、それら移動平均フィルタの各時定数は要求軌跡精度から設定されることを特徴とする請求項 1 記載のサーボ制御装置。

【請求項 5】 機械特性補償部は、

所望の周波数遮断特性を有し、位置指令信号を補正する n 次フィルタ (n は任意の自然数) を備えたことを特徴とする請求項 1 記載のサーボ制御装置。

【請求項 6】 位置指令信号を微分して速度のフィードフォワード信号を演算する微分器と、

上記微分器による演算値を微分すると共に上記駆動対象機械の総イナーシャを乗算する演算器と、

上記演算器による演算値から駆動対象機械の共振周波数成分を減衰し、反共振周波数成分を増幅して、トルクのフィードフォワード信号を演算する振動抑制フィルタと、

位置指令信号、上記微分器により演算された速度のフィードフォワード信号および上記振動抑制フィルタにより演算されたトルクのフィードフォワード信号に応じて上記駆動対象機械を駆動するフィードバック補償部とを備えたサーボ制御装置。

【発明の詳細な説明】

【 0 0 0 1 】

【発明の属する技術分野】

この発明は、工作機械の送り軸や産業ロボットのアームのような負荷機械をモ

ータによって駆動するサーボ制御装置に関するもので、特に、2つ以上の軸を有する機械において軌跡制御を行うサーボ制御装置に関するものである。

【0 0 0 2】

【従来の技術】

従来のサーボ制御装置としては、位置や速度等の被制御量の指令値に対する応答遅れを補償するためにフィードフォワード制御が行われる。例えば、位置指令を微分し位置のフィードフォワード制御量を求め、位置ループ制御で得られた制御量にフィードフォワード制御量を加算し速度指令とし、位置のフィードフォワード制御量を微分して得られる速度のフィードフォワード制御量を、速度ループ制御によって得られる値に加算して電流指令としてサーボ制御を行うことにより、位置制御の応答性を高めているものがある（例えば下記特許文献1の図1）。

また、トルク伝達機構、負荷機械および電動機から構成された機械系を2慣性共振系として近似して構成した機械系モデルに対する模擬制御回路を構成し、模擬制御回路の模擬電動機位置、速度およびトルクをフィードフォワード制御量として位置ループ制御および速度ループ制御によって得られる値に加算することにより、制御対象の剛性が低く、共振特性を有する場合でも振動を励起せずに位置制御の応答性を高めているものがある（例えば下記特許文献2の図25）。

【0 0 0 3】

【特許文献1】

特許第2 7 6 2 3 6 4号公報

【特許文献2】

特開2 0 0 0 - 9 2 8 8 2公報

【0 0 0 4】

【発明が解決しようとする課題】

従来のサーボ制御装置は以上のように構成されているので、特許文献1記載のサーボ制御装置にあっては、制御対象の剛性が高く、剛体と見なすことができる場合にあっては十分な性能を発揮できるが、制御対象の剛性が低く、共振特性を持つ場合に本方式を実施して応答性を高くしようすると、機械共振により被制御量である位置や速度に振動が生じ、図12に示すように位置決め精度や軌跡精

度が低下するという課題があった。

また、特許文献2記載のサーボ制御装置にあっては、制御対象が2慣性共振系と見なすことができる場合には制御対象の位置は常に模擬制御回路の位置に完全に追従し、振動を励起せずに応答性を高めることができるが、模擬制御回路はフィードバック制御系を構成しており、インパルス応答が対称な形にならない。よって、対称な軌跡を指令軌跡として与えても、制御対象の応答軌跡は対称とならない。したがって、図13に示すように同じ形状の指令軌跡を進行方向を変えて往復させた場合、往復の応答軌跡の間には誤差が生じてしまう。このことは、金型を往復加工する際には加工面に傷が生じる原因となるなどの課題があった。

【0005】

この発明は上記のような課題を解決するためになされたもので、機械特性に起因する振動を低減すると共に、往復時の軌跡を一致させるサーボ制御装置を得ることを目的とする。

【0006】

【課題を解決するための手段】

この発明に係るサーボ制御装置は、FIRフィルタ部により補正された位置指令信号から、駆動対象機械の特性に対応した所定の周波数成分を減衰して、位置、速度およびトルクの各フィードフォワード信号を演算する機械特性補償部と、位置、速度およびトルクの各フィードフォワード信号に応じて駆動対象機械を駆動するフィードバック補償部とを備えたものである。

【0007】

【発明の実施の形態】

以下、この発明の実施の一形態を説明する。

実施の形態1.

図1はこの発明の実施の形態1によるサーボ制御装置を示すブロック図であり、図において、サーボ制御装置1は、位置指令信号に応じて機械（駆動対象機械）2を駆動制御するものである。

そのサーボ制御装置1において、FIR（Finite Impulse Response）フィルタ部3は、位置指令信号を補正し、機械特性補償部4は

、補正された位置指令信号から、機械 2 の特性に対応した所定の周波数成分を減衰して、位置、速度およびトルクの各フィードフォワード信号を演算し、フィードバック補償部 5 は、演算された位置、速度およびトルクの各フィードフォワード信号に応じて機械 2 を駆動するものである。

また、FIR フィルタ部 3 は、FIR フィルタ 6 から構成されている。

【0008】

さらに、機械特性補償部 4 において、位置指令演算器 7 は、位置指令信号から機械 2 の反共振周波数成分を減衰して、位置のフィードフォワード信号を演算し、微分器 8 は、位置指令信号を微分し、速度指令演算器 9 は、微分器 8 による演算値から機械 2 の反共振周波数成分を減衰して、速度のフィードフォワード信号を演算し、演算器 10 は、微分器 8 による演算値を微分すると共に機械 2 の総イナーシャを乗算し、トルク指令演算器 11 は、演算器 10 による演算値から機械 2 の共振周波数成分を減衰して、トルクのフィードフォワード信号を演算するものである。

【0009】

さらに、フィードバック補償部 5 において、減算器 12 は、位置のフィードフォワード信号からモータ位置信号を減算し位置制御器 13 に出力し、位置制御器 13 は、速度制御信号を求め、加減算器 14 は、速度のフィードフォワード信号と速度制御信号とを加算すると共にモータ速度信号を減算し速度制御器 15 に出力し、速度制御器 15 は、トルク制御信号を求め、加算器 16 は、トルクのフィードフォワード信号とトルク制御信号とを加算し、機械 2 にモータトルク指令信号として出力するものである。

機械 2 は、モータトルク指令信号に応じて負荷 18 を駆動するモータ 17 から構成されている。

【0010】

次に動作について説明する。

図 1 において、位置指令信号は FIR フィルタ 6 によって平滑化され、機械特性補償部 4 に出力される。ここで、FIR フィルタ 6 は、時定数 T_f の移動平均フィルタを 2 個以上直列に結合して構成される。ここで、移動平均フィルタの時

定数とは、移動平均フィルタのタップ数にサンプリング周期を乗じた値を指す。
 さらに、時定数 T_f は、応答軌跡が要求軌跡精度を満たすように、要求軌跡精度パラメータから所定の演算により算出される。要求軌跡精度パラメータは、コーナ通過時のだれ量（応答軌跡がコーナ頂点に最も近付いた時のコーナ頂点までの距離）や、円弧内回り量（応答軌跡の半径の指令半径に対する減少量）等がある。

【 0 0 1 1 】

機械特性補償部 4 では、まず、機械特性補償部 4 の入力信号 x_{r1} が位置指令演算器 7 に入力されて、位置のフィードフォワード信号 x_a が演算される。位置指令演算器 7 は、入力信号 x_{r1} 中の機械 2 の反共振周波数 ω_z の成分を減衰して出力する演算器であり、入力信号 x_{r1} と出力信号 x_a との関係は次の式（1）で表される。なお、 s はラプラス演算子である。

【数 1】

$$x_a(s) = \left(1 + \frac{1}{\omega_z^2} s^2 \right) x_{r1}(s) \quad (1)$$

【 0 0 1 2 】

また、機械特性補償部 4 の入力信号 x_{r1} は、微分器 8 によって微分された後、速度指令演算器 9 に入力されて、速度のフィードフォワード信号 v_a が演算される。速度指令演算器 9 は、入力信号 v_{r1} 中の機械 2 の反共振周波数 ω_z の成分を減衰して出力する演算器であり、入力信号 v_{r1} と出力信号 v_a との関係は次の式（2）で表される。

【数 2】

$$v_a(s) = \left(1 + \frac{1}{\omega_z^2} s^2 \right) v_{r1}(s) \quad (2)$$

【 0 0 1 3 】

さらに、微分器 8 の出力信号は演算器 10 によって微分されて機械 2 の総イナーシャ J を乗算された後、トルク指令演算器 11 に入力されて、トルクのフィードフォワード信号 τ_a が演算される。ここで言う総イナーシャとは、モータイナーシャと負荷イナーシャとの合計イナーシャである。トルク指令演算器 11 は、入力信号 τ_{r1} 中の機械 2 の共振周波数 ω_p の成分を減衰して出力する演算器であり、入力信号 τ_{r1} と出力信号 τ_a との間の関係は次の式 (3) で表される。

【数 3】

$$\tau_a(s) = \left(1 + \frac{1}{\omega_p^2} s^2 \right) \tau_{r1}(s) \quad (3)$$

【0014】

次に、位置のフィードフォワード信号 x_a 、速度のフィードフォワード信号 v_a 、トルクのフィードフォワード信号 τ_a は、フィードバック補償部 5 に入力される。フィードバック補償部 5 では、減算器 12 において、位置のフィードフォワード信号 x_a から機械 2 より出力されるモータ位置信号 x_m を減じて位置制御器 13 に出力し、位置制御器 13 では速度制御信号 v_c を求める。なお、位置制御器 13 は、フィードバック制御系が安定となるものであればどのような構成でも良いが、通常は比例制御器等が用いられる。また、加減算器 14 において、速度のフィードフォワード信号 v_a と速度制御信号 v_c とを加算した値から、機械 2 より出力されるモータ速度信号 v_m を減じて速度制御器 15 に出力し、速度制御器 15 ではトルク制御信号 τ_c を求める。なお、速度制御器 15 は、フィードバック制御系が安定になるものであればどのような構成でも良いが、通常は比例、積分制御器等が用いられる。さらに、加算器 16 において、トルクのフィードフォワード信号 τ_a とトルク制御信号 τ_c とを加算した値がモータトルク指令信号 τ_m として機械 2 に出力されてモータ 17 が駆動される。機械 2 はモータ設置台の上に設置されたモータ 17 と負荷 18 がトルク伝達機構で結合されており、モータ 17 に取り付けられた回転検出器によってモータ位置信号 x_m およびモータ速度信号 v_m が出力される。ここで、モータ 17 が発生するトルクは、モータトルク指令信号 τ_m に十分速く追従するものである。

【0015】

このような構成によれば、機械 2 の振動特性に応じて、機械 2 の負荷位置が機械特性補償部 4 の入力信号 x_{r1} に完全に追従するように適切に演算された位置、速度およびトルクのフィードフォワード信号がフィードバック補償部 5 に出力されるため、負荷位置 x_l は機械特性補償部 4 の入力信号 x_{r1} に完全に追従する。このことを式で表現すると次のようになる。機械 2 が 2 慣性共振系で近似できる場合、モータトルク指令信号 τ_m とモータ位置 x_m の間の関係は次の式 (4) のようになる。

【数 4】

$$x_m(s) = \frac{1}{Js^2} \frac{1 + \frac{1}{\omega_z^2} s^2}{1 + \frac{1}{\omega_p^2} s^2} \tau_m(s) \quad (4)$$

また、モータ位置 x_m と負荷位置 x_l の間の関係は次の式 (5) のようになる。

【数 5】

$$x_l(s) = \frac{1}{1 + \frac{1}{\omega_z^2} s^2} x_m(s) \quad (5)$$

また、モータ速度 v_m とモータ位置 x_m の間の関係は、次の式 (6) のようになる。

$$v_m(s) = s \cdot x_m(s) \quad (6)$$

【0016】

さらに、位置制御器 13 および速度制御器 15 の伝達関数をそれぞれ $C_p(s)$ および $C_v(s)$ とすると、フィードバック補償部 5 の入出力関係は、次の式 (7) で表される。

$$\tau_m(s) = C_v(s) (C_p(s) (x_a(s) - x_m(s)))$$

$$+v_a(s) - v_m(s)) + \tau_a(s) \quad (7)$$

式(1)から式(5)、式(6)、式(7)の各関係式が成り立つことを考慮して、この実施の形態1における機械特性補償部4の入力信号 x_{r1} と機械2の負荷位置 x_1 の間の関係を求めると、 $x_1 = x_{r1}$ となる。すなわち、負荷位置 x_1 は機械特性補償部4の入力信号 x_{r1} に完全に追従する。したがって、指令位置から負荷位置までの応答特性は、FIRフィルタ6の応答特性と等しくなる。

【0017】

図2は対称なインパルス応答を示す特性図であり、FIRフィルタ6のインパルス応答がこの図2に示すように対称な形に近ければ、公知のように入力が対称であれば出力も対称になるため、対称な指令軌跡に対する応答軌跡は対称となり、同じ形状の軌跡を往復させた時の往復の応答軌跡がほぼ同じ形となる。さらに、FIRフィルタ6のインパルス応答が完全に対称な形であれば、すなわち直線位相FIRフィルタであれば、対称な指令軌跡に対する応答軌跡は完全に対称となり、同じ形状の軌跡を往復させた時の往復の応答軌跡は一致する。また、トルクのフィードフォワード信号 τ_{r1} は機械特性補償部4の入力信号 x_{r1} を最大で4階微分した成分を含み、機械特性補償部4の入力信号 x_{r1} が十分に平滑化されていない場合には、トルクのフィードフォワード信号 τ_{r1} がインパルス状の非常に大きな値となって機械2に悪影響を与えることが考えられるが、FIRフィルタ6の構成を、移動平均フィルタの2個の直列結合としたことで、位置指令信号 x_{r1} が、位置制御で良く用いられる加速度ステップ指令であれば、機械特性補償部4の入力信号 x_{r1} を4階微分してもインパルス状の信号にならず、トルクのフィードフォワード信号 τ_{r1} がインパルス状の非常に大きな成分を含むことが回避される。また、このFIRフィルタ6のインパルス応答は対称な形であることから、対称な指令軌跡に対する応答軌跡は完全に対称となり、同じ形状の軌跡を往復させた時の往復の応答軌跡は一致する。

【0018】

なお、FIRフィルタ6は直線位相FIRフィルタのように直線位相特性を有するものが好ましいが、直線位相特性を有しない一般のFIRフィルタを用いて

も、出力が過去の有限時間の履歴から定まるため、F I R フィルタ以外のフィルタ、すなわち I I R (I n f i n i t e I m p u l s e R e s p o n s e) フィルタを用いる場合よりも対称な応答軌跡を得やすいという利点がある。なお、F I R フィルタについては、例えば F . R . コナー著 フィルタ回路入門（森北出版）等に詳細な解説がある。

【 0 0 1 9 】

次に、この実施の形態 1 による効果を数値シミュレーションによって示す。

図 3 はこの発明の実施の形態 1 によるサーボ制御装置を示す全体構成図であり、図において、x 軸用、y 軸用サーボ制御装置 1 a, 1 b により、2 軸の自由度を持つ機械 2 を x 軸用、y 軸用モータ 1 7 a, 1 7 b を用いて駆動するものである。

図 4 はこの発明の実施の形態 1 によるサーボ制御装置の指令軌跡と応答軌跡とを示す特性図である。指令軌跡は角度 9 0 度のコーナーの形状であり、応答軌跡はこの指令軌跡の進行方向を、進行方向 A および進行方向 B とした場合、すなわち同じ形状の軌跡を往復させた場合について示している。機械 2 の共振周波数 ω_p は 3 0 0 r a d / s、反共振周波数 ω_z は 2 0 0 r a d / s としている。

図 4 に示した例では、応答軌跡は従来における特許文献 1 に比較して振動が抑制されており、特許文献 2 に比較して往復の応答軌跡の差が低減されていることがわかる。以上により、金型等を往復加工させる場合でも、傷のない加工面が得られる。

【 0 0 2 0 】

以上のように、この実施の形態 1 によれば、機械特性補償部 4 において、機械 2 を 2 慣性共振系と見なせ、機械 2 の粘性摩擦による減衰特性が無視できる場合に、機械 2 の特性値（共振周波数、反共振周波数、総イナーシャ）を用いて位置、速度およびトルクのフィードフォワード信号を求めることにより、機械 2 の特性に起因する振動を低減することができる。

また、機械特性補償部 4 により得られるフィードフォワード信号をフィードバック補償部 5 に出力することにより、機械 2 の位置を機械特性補償部 4 の入力、すなわち F I R フィルタ部 3 の出力に完全に追従させることができる。

さらに、FIRフィルタ部3により、軌跡を容易に対称な形にして、往復時の軌跡が一致させることができるため、往復加工を行う場合でも段差のない加工面を得ることができる。

さらに、FIRフィルタ部3を2段以上の移動平均フィルタとし、移動平均フィルタの時定数を要求軌跡精度に応じて設定することにより、軌跡の対称性を保ち、フィードバック補償部5に入力される信号が大きなインパルス状の信号となって機械2に大きなショックを与えることを回避すると共に、応答軌跡の指令軌跡からの誤差を要求軌跡精度以内とすることができる。

【0021】

実施の形態2.

図5はこの発明の実施の形態2によるサーボ制御装置を示すブロック図であり、図において、1次遅れフィルタ21は、機械特性補償部4に設けられ、機械2の粘性摩擦による減衰特性の影響を低減するように、時定数が機械2の減衰定数、反共振周波数および負荷イナーシャに応じて設定されるものであり、位置指令信号を補正するものである。

また、位置指令演算器22は、1次遅れフィルタ21により補正された位置指令信号から、機械2の粘性摩擦による減衰特性を考慮した機械2の反共振周波数成分を減衰して、位置のフィードフォワード信号を演算するものであり、速度指令演算器23は、微分器8による演算値から、機械2の粘性摩擦による減衰特性を考慮した機械2の反共振周波数成分を減衰して、速度のフィードフォワード信号を演算するものであり、トルク指令演算器24は、演算器10による演算値から機械2の粘性摩擦による減衰特性を考慮した機械2の共振周波数成分を減衰して、トルクのフィードフォワード信号を演算するものである。

その他の構成については、図1と同等である。

【0022】

次に動作について説明する。

図5において、上記実施の形態1と相違する点は、機械特性補償部4の入力信号 x_{r1} を1次遅れフィルタ21で補正してから位置指令演算器22および微分器8に出力する点と、位置指令演算器22、速度指令演算器23およびトルク指

令演算器 2 4 において、機械 2 の減衰特性を考慮した構成とした点である。

位置指令演算器 2 2、速度指令演算器 2 3 およびトルク指令演算器 2 4 において、機械 2 の粘性摩擦による減衰特性を考慮して機械 2 の反共振周波数成分や共振周波数成分を減衰するが、不十分となる場合が多い。

【 0 0 2 3 】

そこで、1 次遅れフィルタ 2 1 では、機械 2 の反共振周波数成分や共振周波数成分のその不十分な減衰が十分となるように時定数を設定し、機械特性補償部 4 の入力信号 x_{r1} を補正するものである。1 次遅れフィルタ 2 1 の入力信号 x_{r1} と出力信号 x_{r2} との間の関係は次の式 (8) で表される。

【数 6】

$$x_{r2}(s) = \frac{1}{1 + 2\frac{\xi_z}{\omega_z}s} x_{r1}(s) \quad (8)$$

ここで、 ξ_z は機械の減衰定数 c 、反共振周波数 ω_z 、負荷イナーシャ J_1 を用いて次の式 (9) のように表せる。

【数 7】

$$\xi_z = \frac{c}{2\omega_z J_1} \quad (9)$$

【 0 0 2 4 】

また、位置指令演算器 2 2 は、1 次遅れフィルタ 2 1 により補正された入力信号 x_{r2} 中の機械 2 の減衰特性を考慮した機械 2 の反共振周波数 ω_z の成分を減衰して出力する演算器であり、入力信号 x_{r2} と出力信号 x_a との間の関係は次の式 (10) で表される。

【数 8】

$$x_a(s) = \left(1 + 2\frac{\xi_z}{\omega_z}s + \frac{1}{\omega_z^2}s^2 \right) x_{r2}(s) \quad (10)$$

【 0 0 2 5 】

また、速度指令演算器 2 3 は、入力信号 v_{r1} 中の機械 2 の減衰特性を考慮した機械 2 の反共振周波数 ω_z の成分を減衰して出力する演算器であり、入力信号 v_{r1} と出力信号 v_a との関係は次の式 (1 1) で表される。

【数 9】

$$v_a(s) = \left(1 + 2 \frac{\xi_z}{\omega_z} s + \frac{1}{\omega_z^2} s^2 \right) v_{r1}(s) \quad (1 1)$$

【0 0 2 6】

さらに、トルク指令演算器 2 4 は、入力信号 τ_{r1} 中の機械 2 の減衰特性を考慮した機械 2 の共振周波数 ω_p の成分を減衰して出力する演算器であり、入力信号 τ_{r1} と出力信号 τ_a との関係は次の式 (1 2) で表される。

【数 1 0】

$$\tau_a(s) = \left(1 + 2 \frac{\xi_p}{\omega_p} s + \frac{1}{\omega_p^2} s^2 \right) \tau_{r1}(s) \quad (1 2)$$

ここで、減衰比 ξ_p は機械の減衰定数 c 、共振周波数 ω_p 、負荷イナーシャ J_l 、モータイナーシャ J_m を用いて次の式 (1 3) のように表せる。

【数 1 1】

$$\xi_p = \frac{c}{2\omega_p} \left(\frac{1}{J_m} + \frac{1}{J_l} \right) \quad (1 3)$$

【0 0 2 7】

このような構成によれば、機械 2 が粘性摩擦等による減衰特性を有する場合でも負荷位置 x_l は機械特性補償部 4 の入力信号 x_{r1} に完全に追従する。このことを式で表現すると次のようになる。機械 2 が 2 慣性共振系で近似できて減衰特性を有する場合、モータトルク指令信号 τ_m とモータ位置 x_m の間の関係は次の式 (1 4) のようになる。

【数 1 2】

$$x_m(s) = \frac{1}{Js^2} \frac{1 + 2\frac{\xi_z}{\omega_z}s + \frac{1}{\omega_z^2}s^2}{1 + 2\frac{\xi_p}{\omega_p}s + \frac{1}{\omega_p^2}s^2} \tau_m(s) \quad (14)$$

【0028】

また、モータ位置 x_m と負荷位置 x_l の間の関係は次の式 (15) のようになる。

【数 1 3】

$$x_l(s) = \frac{1 + 2\frac{\xi_z}{\omega_z}s}{1 + 2\frac{\xi_z}{\omega_z}s + \frac{1}{\omega_z^2}s^2} x_m(s) \quad (15)$$

【0029】

また、モータ速度 v_m とモータ位置 x_m の間の関係およびフィードバック補償部 5 の入出力関係は、上記実施の形態 1 と同様になり、それぞれ式 (6) および式 (7) で表される。式 (6) および式 (7)、式 (8) から式 (15) の各関係式が成り立つことを考慮して、この実施の形態 2 における機械特性補償部 4 の入力信号 x_{r1} と機械 2 の負荷位置 x_l の間の関係を求めると、 $x_l = x_{r1}$ となる。すなわち、負荷位置 x_l は機械特性補償部 4 の入力信号 x_{r1} に完全に追従する。したがって、指令位置から機械 2 の負荷位置までの応答特性が、FIR フィルタ 6 の応答特性と一致し、対称で振動を励起しない応答軌跡を得ることができる。

【0030】

次に、この実施の形態 2 の効果を数値シミュレーションによって示す。

図 6 はこの発明の実施の形態 2 によるサーボ制御装置の指令軌跡と応答軌跡とを示す特性図であり、図 6 (a) は x 軸、y 軸の 2 軸の自由度を持つ機械を、この実施の形態 2 によるサーボ制御装置によって駆動した時の指令軌跡と応答軌跡であり、図 6 (b) は上記実施の形態 1 による指令軌跡と応答軌跡である。指令

軌跡は角度 9 0 度のコーナーの形状であり、機械 2 の共振周波数 ω_p は 3 0 0 r a d / s、反共振周波数 ω_z は 2 0 0 r a d / s としている。さらに、減衰比 ζ_p を 0. 2 としている。

図 6 に示した例では、機械 2 に減衰特性がある場合には、この実施の形態 2 によるサーボ制御装置を用いることによって、上記実施の形態 1 によるサーボ制御装置を用いた場合に比較して、応答軌跡の振動を抑制できることがわかる。

【 0 0 3 1 】

以上のように、この実施の形態 2 によれば、位置指令演算器 2 2、速度指令演算器 2 3 およびトルク指令演算器 2 4 において、機械 2 の粘性摩擦の減衰特性を考慮した機械 2 の反共振周波数成分または共振周波数成分を減衰し、1 次遅れフィルタ 2 1 において、それらの減衰が十分となるように時定数が設定され、入力される位置指令信号を補正することにより、機械 2 が 2 慣性共振系と見なせる場合で機械 2 の粘性摩擦による減衰特性がある場合でも機械位置、すなわち負荷位置を機械振動を励起せずに位置指令に完全に追従させることができる。

【 0 0 3 2 】

実施の形態 3.

図 7 はこの発明の実施の形態 3 によるサーボ制御装置を示すブロック図であり、図において、5 次 I I R フィルタ（n 次フィルタ）3 1 は、機械特性補償部 4 に設けられ、所望の周波数遮断特性を有し、位置指令信号を補正するものである。

その他の構成については、図 1 と同等である。

【 0 0 3 3 】

次に動作について説明する。

図 7 において、上記実施の形態 1 と相違する点は、機械特性補償部 4 の入力信号 x_{r1} を 5 次 I I R フィルタ 3 1 で補正してから位置指令演算器 7 および微分器 8 に出力する点である。5 次 I I R フィルタ 3 1 は、例えば次の式（16）で表される構成とする。

【数 1 4】

$$x_{r2}(s) = \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{K_1}s\right)\left(1 + \frac{1}{K_2}s\right)\left(1 + \frac{1}{K_3}s\right)\left(1 + \frac{1}{K_4}s\right)\left(1 + \frac{1}{K_5}s\right)} x_{r1}(s) \quad (16)$$

ここで、 K_1 から K_5 は 5 次 I I R フィルタ 3 1 の周波数遮断特性を決定する極を表すパラメータである。

図 8 は 5 次 I I R フィルタのゲイン曲線の一例を示す特性図である。一例として、 $K_1 = K_2 = K_3 = K_4 = K_5 = 1000$ のときの 5 次 I I R フィルタ 3 1 のゲイン曲線を示すとこの図 8 のようになり、 400 rad/s 付近よりも高い周波数領域が遮断されていることがわかる。

【0 0 3 4】

このような構成によれば、機械 2 が 2 慣性共振系で近似できず、共振周波数 ω_p よりも高い周波数領域に別の共振点が存在する場合でも、その共振点付近の周波数成分が 5 次 I I R フィルタ 3 1 により遮断されるので、応答軌跡の振動を低減させることができる。また、位置指令信号に高周波のノイズが含まれることによって応答軌跡に振動が生じる場合でも、位置指令信号に含まれる高周波数領域の成分が 5 次 I I R フィルタ 3 1 により遮断されるので、応答軌跡の振動を低減させることができる。

【0 0 3 5】

次に、この実施の形態 3 の効果を数値シミュレーションによって示す。

図 9 はこの発明の実施の形態 3 によるサーボ制御装置の指令軌跡と応答軌跡とを示す特性図であり、図 9 (a) は x 軸、y 軸の 2 軸の自由度を持つ機械を、この実施の形態 3 によるサーボ制御装置によって駆動した時の指令軌跡と応答軌跡であり、図 9 (b) は上記実施の形態 1 による指令軌跡と応答軌跡である。指令軌跡は角度 90 度のコーナーの形状であり、機械 2 の共振周波数 ω_p は 300 rad/s 、反共振周波数 ω_z は 200 rad/s としている。さらに、 1000 rad/s に第 2 の共振周波数があり、 700 rad/s に第 2 の反共振周波数

がある機械としている。

図 9 に示した例では、機械 2 が 2 慣性共振系で近似できず、第 2 の共振周波数、第 2 の反共振周波数がある場合には、この実施の形態 3 によるサーボ制御装置を用いることによって、上記実施の形態 1 によるサーボ制御装置を用いた場合に比較して、応答軌跡の振動を抑制できることがわかる。

【0036】

以上のように、この実施の形態 3 によれば、機械特性補償部 4 に、所望の周波数遮断特性を有する 5 次 IIR フィルタ 31 を備え、入力される位置指令信号を、その 5 次 IIR フィルタ 31 で補正することにより、位置指令信号に含まれるノイズや、機械特性補償部 4 のパラメータである機械 2 の共振周波数、反共振周波数よりも高い周波数領域に別の共振点および反共振点が存在する場合に応答軌跡に現れる悪影響を低減することができる。

なお、この実施の形態 3 では、5 つの所望の極を有する 5 次 IIR フィルタ 31 を設けたが、1 次以上のいずれの IIR フィルタを設けても良い。

【0037】

実施の形態 4.

図 10 はこの発明の実施の形態 4 によるサーボ制御装置を示すブロック図であり、図において、機械特性補償部 4 に直接に入力された位置指令信号を、位置のフィードフォワード信号として減算器 12 に出力し、微分器 8 は、位置指令信号を微分して速度のフィードフォワード信号を演算し、加減算器 14 に出力し、演算器 10 は、微分器 8 による演算値を微分すると共に機械 2 の総イナーシャを乗算し、振動抑制フィルタ 41 は、演算器 10 による演算値から機械 2 の共振周波数成分を減衰し、反共振周波数成分を増幅して、トルクのフィードフォワード信号を演算し、加算器 16 に出力するものである。

その他の構成については、図 1 と同等である。

【0038】

次に動作について説明する。

図 10 において、機械特性補償部 4 に直接に入力された位置指令信号 x_r は位置のフィードフォワード信号 x_a としてフィードバック補償部 5 に出力される。

また、位置指令信号は微分器 8 によって微分され、速度のフィードフォワード信号 v_a としてフィードバック補償部 5 に出力される。さらに、微分器 8 による演算値は演算器 10 によって微分されて機械 2 の総イナーシャが乗算された後、振動抑制フィルタ 41 に出力され、振動抑制フィルタ 41 の出力信号はトルクのフィードフォワード信号 τ_a としてフィードバック制御部 5 に出力される。フィードバック補償部 5 および機械 2 の構成と動作は上記実施の形態 1 と同様である。

次に、振動抑制フィルタ 41 について説明する。振動抑制フィルタ 41 における入力信号 τ_{r1} と出力信号 τ_a との関係は、機械 2 の共振周波数 ω_p と機械 2 の反共振周波数 ω_z を用いて次の式 (17) で表されるものとする。

【数 15】

$$\tau_a(s) = \frac{1 + \frac{1}{\omega_z^2} s^2}{1 + \frac{1}{\omega_p^2} s^2} \tau_{r1}(s) \quad (17)$$

このように演算器 10 による演算値から機械 2 の共振周波数成分を減衰し、反共振周波数成分を増幅するものである。

【0039】

このような構成によれば、より簡易な構成で機械振動の低減を図ることができる。また、機械 2 が、モータ 17 と負荷 18 との間の剛性は高いがモータ 17 とモータ設置台との間の剛性が低く、機械振動がモータ 17 とモータ設置台との間の共振および反共振が原因で起こる場合には、その共振および反共振に起因する振動成分が振動低減フィルタ 41 によって取り除かれて、負荷位置 x_l は位置指令信号 x_r に完全に追従する。

このことを式で表現すると次のようになる。機械 2 が、モータ 17 と負荷 18 との間の剛性は十分高く、モータ 17 とモータ設置台との間の剛性が低いようなモデルで近似できる場合、モータトルク指令信号 τ_m とモータ位置 x_m の間の関係は次の式 (18) のようになる。

【数 1 6】

$$x_m(s) = \frac{1}{Js^2} \frac{1 + \frac{1}{\omega_z^2} s^2}{1 + \frac{1}{\omega_p^2} s^2} \tau_m(s) \quad (18)$$

【0 0 4 0】

また、モータ位置 x_m と負荷位置 x_l の間の関係は次の式 (19) のようになる。

$$x_l(s) = x_m(s) \quad (19)$$

また、モータ速度 v_m とモータ位置 x_m の間の関係およびフィードバック補償部 5 の入出力関係は、上記実施の形態 1 と同様となり、それぞれ式 (6) および式 (7) で表される。式 (6) および式 (7)、式 (17) から式 (19) の各関係式が成り立つことを考慮して、この実施の形態 4 における位置指令信号 x_r と機械 2 の負荷位置 x_l の間の関係を求めると、 $x_l = x_r$ となる。すなわち、負荷位置 x_l は位置指令信号 x_r に完全に追従する。したがって、効果的に機械振動を抑制することができる。

【0 0 4 1】

次に、この実施の形態 4 の効果を数値シミュレーションによって示す。

図 1 1 はこの発明の実施の形態 4 によるサーボ制御装置の指令軌跡と応答軌跡とを示す特性図であり、 x 軸、 y 軸の 2 軸の自由度を持つ機械 2 を駆動した時の指令軌跡と応答軌跡とを示したものである。指令軌跡は角度 90 度のコーナーの形状であり、応答軌跡はこの指令軌跡の進行方向を図 1 3 による進行方向 A および進行方向 B とした場合、すなわち同じ形状の軌跡を往復させた場合について示している。また、機械 2 は、モータ 17 と負荷 18 との間の剛性は十分高いが、モータ 17 とモータ設置台との間の剛性が低いものとしている。機械 2 の共振周波数 ω_p は 300 rad/s、反共振周波数 ω_z は 200 rad/s としている。

図 1 1 に示した例では、応答軌跡は、機械 2 においてモータ 17 とモータ設置台との間の剛性が低い場合でも、この実施の形態 4 によるサーボ制御装置を用い

ることによって、従来例に比較して応答軌跡の振動や、往復の応答軌跡の差が抑制されていることがわかる。

【0 0 4 2】

以上のように、この実施の形態 4 によれば、振動抑制フィルタ 4 1 において、演算器 1 0 による演算値から機械 2 の共振周波数成分を減衰し、反共振周波数成分を増幅して、トルクのフィードフォワード信号を演算することにより、上記実施の形態 1 よりも簡単な構成で振動抑制効果を得ることができる。特に、機械 2 のモータ 1 7 とモータ設置台との間の剛性が低いことが原因で振動が起こる場合において、機械 2 の振動を抑制することができる。

【0 0 4 3】

なお、以上の説明ではフィードバック補償部 5 の入力位置、速度、トルクである場合について説明したが、トルクの代わりに加速度を入力するようにしても良い。この場合、上記各実施の形態における演算器 1 0 を微分のみを行うものに置き換えることによって、同様の効果を得ることができる。あるいは、トルクの代わりに電流を入力するようにしても良い。この場合、上記各実施の形態における演算器 1 0 において乗算する値を、機械 2 の総イナーシャをモータ 1 7 のトルク定数で除した値に置き換えることによって、同様の効果を得ることができる。

また、以上の説明ではモータ 1 7 は回転型でトルクを発生するものとして説明したが、リニアモータのように推力を得るものであっても良い。この場合、上記各実施の形態におけるイナーシャを質量に、トルクを推力にそれぞれ置き換えることによって、同様の効果を得ることができる。

【0 0 4 4】

さらに、以上の説明では位置制御を行う場合について説明したが、速度制御の場合であっても良い。速度制御の場合は上記各実施の形態において位置のフィードバックループと位置のフィードフォワード信号を除くことによって同様の効果を得ることができる。

【0 0 4 5】

さらに、上記各実施の形態において、位置指令演算部、速度指令演算部、トルク指令演算部において、離散化によって生じるむだ時間や制御対象の微少なモデ

ル誤差に対する調整を行うための調整係数を掛けるものであっても良い。あるいは、微分器 8 および演算器 1 0 に同様の調整係数を掛けるものであっても良い。

【0 0 4 6】

さらに、上記各実施の形態において、機械特性補償部 4 は、入力から出力までの伝達関数が異ならなければ各構成要素の順序等が異なっても良い。例えば、速度のフィードフォワード信号 v_a は、位置のフィードフォワード信号 x_a を微分することによって求めても良い。

【0 0 4 7】

さらに、上記実施の形態 1 から 3 において、F I R フィルタ部 3 と機械特性補償部 4 の順序が入れ替わっていても良い。すなわち、位置指令信号を機械特性補償部 4 に入力して、その各出力を F I R フィルタ部 3 にそれぞれ入力して位置、速度およびトルクのフィードフォワード信号を求めても良い。

【0 0 4 8】

【発明の効果】

以上のように、この発明によれば、機械特性補償部により、位置指令信号から駆動対象機械の特性に対応した所定の周波数成分を減衰して、位置、速度およびトルクの各フィードフォワード信号を演算することから、駆動対象機械の特性に起因する振動を低減することができる。また、機械特性補償部により演算されたフィードフォワード信号をフィードバック補償部に入力することにより、駆動対象機械位置を機械特性補償部の入力、すなわち、F I R フィルタ部の出力に完全に追従させることができる。さらに、F I R フィルタ部により、軌跡を容易に対称な形にして、往復時の軌跡を一致させることができるため、往復加工を行う場合でも段差のない加工面を得ることができる効果がある。

【図面の簡単な説明】

【図 1】 この発明の実施の形態 1 によるサーボ制御装置を示すブロック図である。

【図 2】 対称なインパルス応答を示す特性図である。

【図 3】 この発明の実施の形態 1 によるサーボ制御装置を示す全体構成図である。

【図 4】 この発明の実施の形態 1 によるサーボ制御装置の指令軌跡と応答軌跡とを示す特性図である。

【図 5】 この発明の実施の形態 2 によるサーボ制御装置を示すブロック図である。

【図 6】 この発明の実施の形態 2 によるサーボ制御装置の指令軌跡と応答軌跡とを示す特性図である。

【図 7】 この発明の実施の形態 3 によるサーボ制御装置を示すブロック図である。

【図 8】 5 次 I I R フィルタのゲイン曲線の一例を示す特性図である。

【図 9】 この発明の実施の形態 3 によるサーボ制御装置の指令軌跡と応答軌跡とを示す特性図である。

【図 1 0】 この発明の実施の形態 4 によるサーボ制御装置を示すブロック図である。

【図 1 1】 この発明の実施の形態 4 によるサーボ制御装置の指令軌跡と応答軌跡とを示す特性図である。

【図 1 2】 従来のサーボ制御装置の指令軌跡と応答軌跡とを示す特性図である。

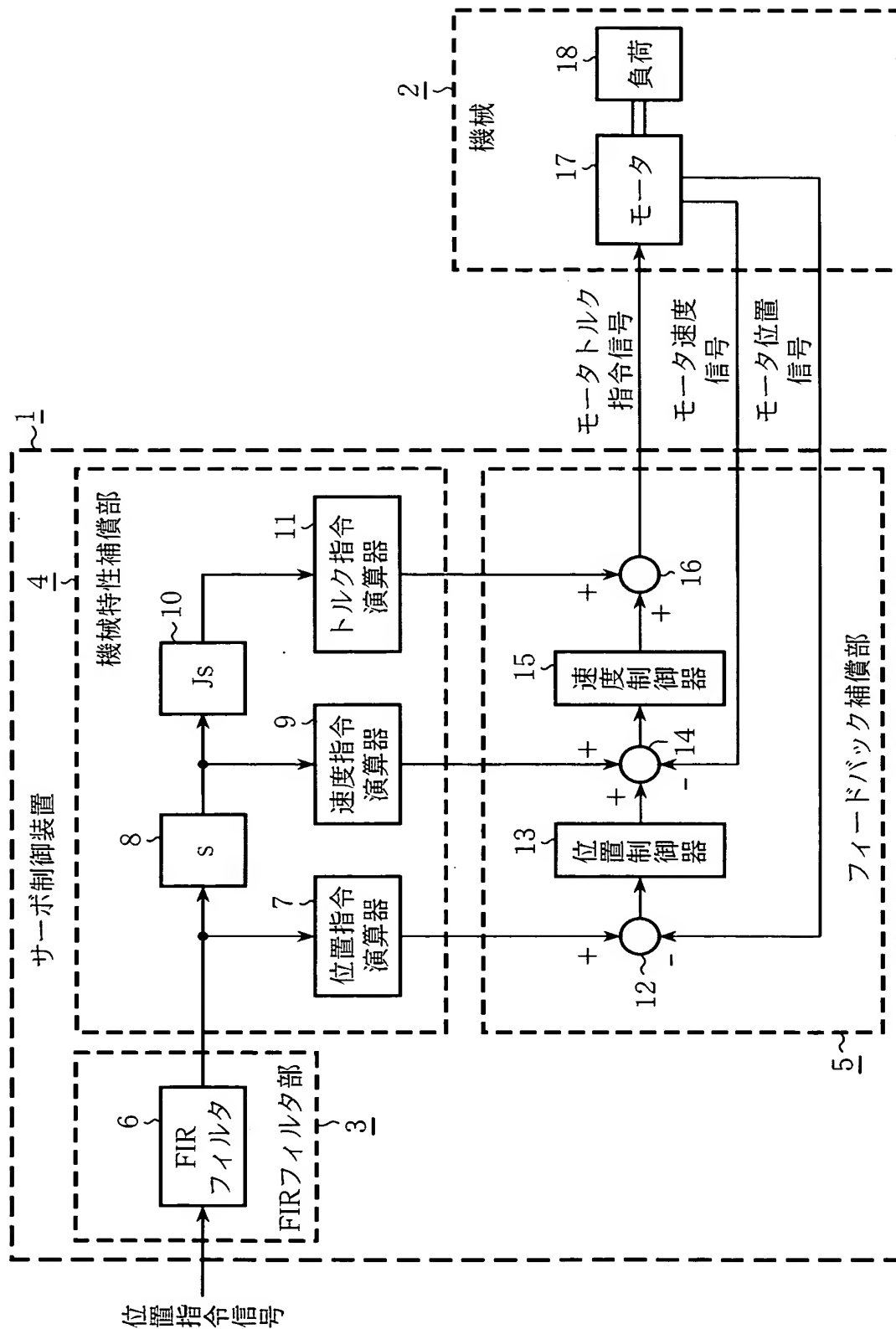
【図 1 3】 従来のサーボ制御装置の指令軌跡と応答軌跡とを示す特性図である。

【符号の説明】

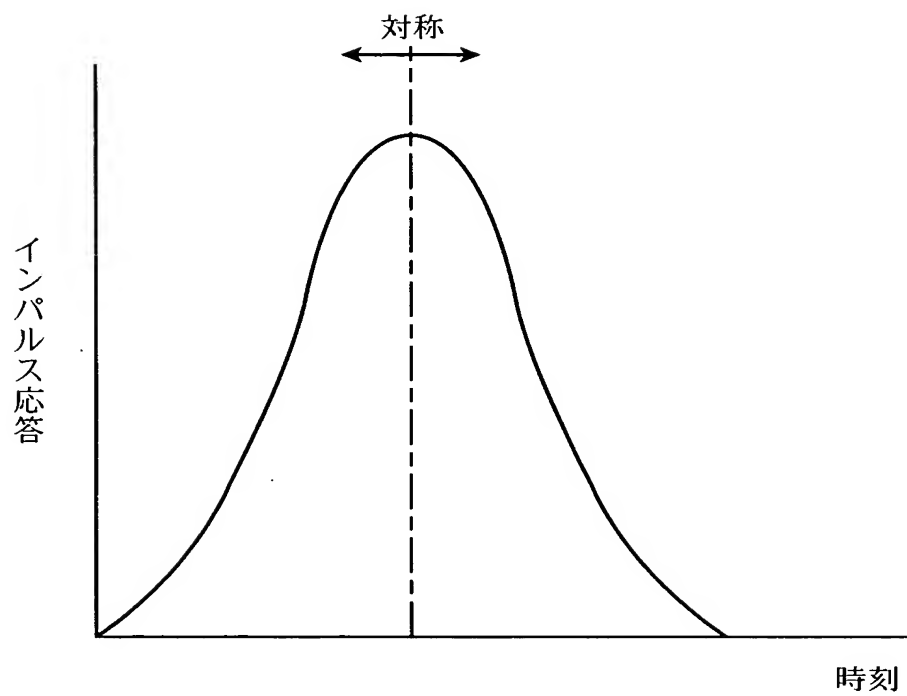
1 サーボ制御装置、1 a x 軸用サーボ制御装置、1 b y 軸用サーボ制御装置、2 機械（駆動対象機械）、3 F I R フィルタ部、4 機械特性補償部、5 フィードバック補償部、6 F I R フィルタ、7, 2 2 位置指令演算器、8 微分器、9, 2 3 速度指令演算器、1 0 演算器、1 1, 2 4 トルク指令演算器、1 2 減算器、1 3 位置制御器、1 4 加減算器、1 5 速度制御器、1 6 加算器、1 7 モータ、1 7 a x 軸用モータ、1 7 b y 軸用モータ、1 8 負荷、2 1 1 次遅れフィルタ、3 1 5 次 I I R フィルタ（n 次フィルタ）、4 1 振動抑制フィルタ。

【書類名】 図面

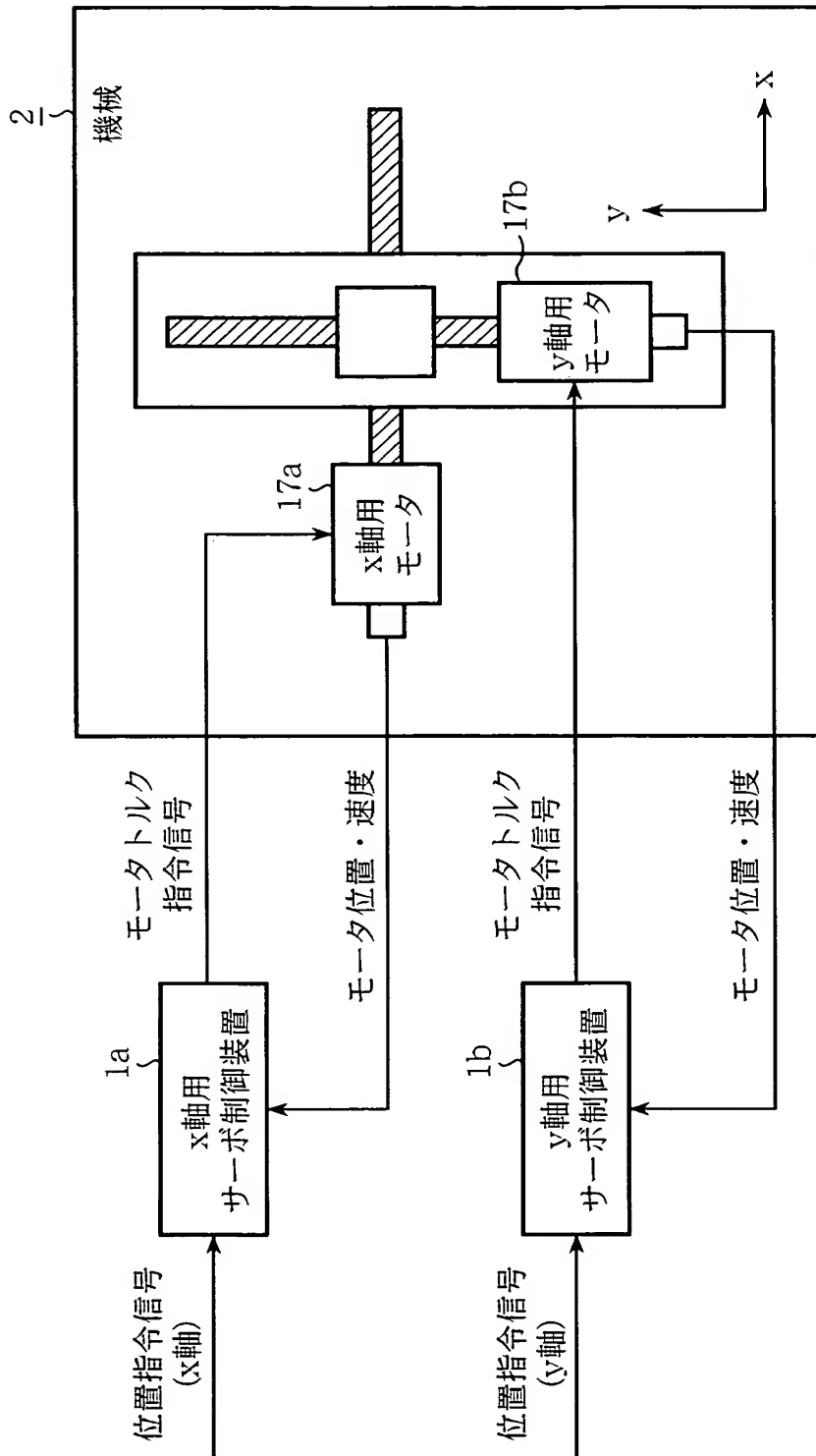
【図 1】



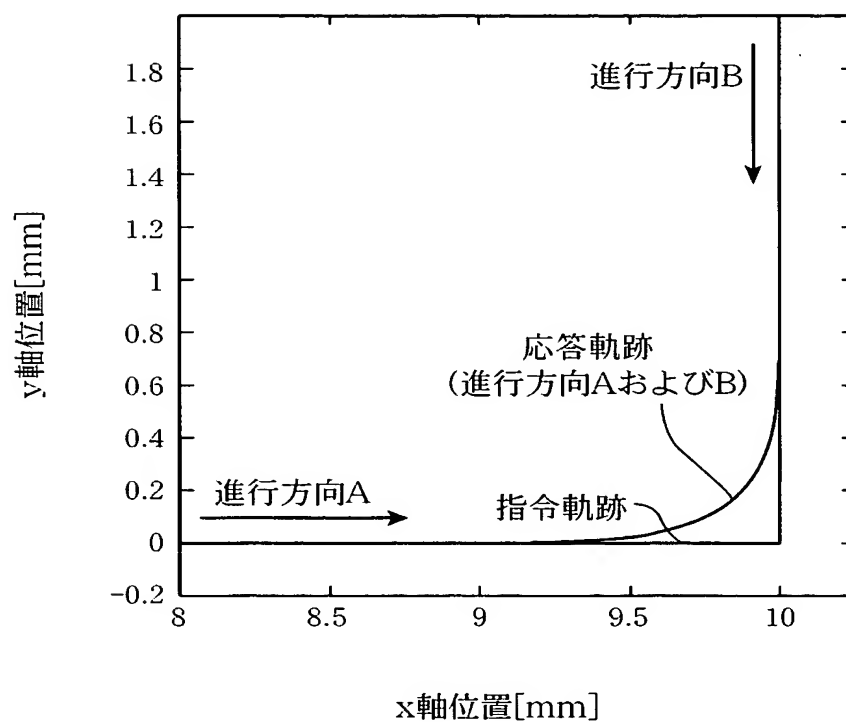
【図 2】



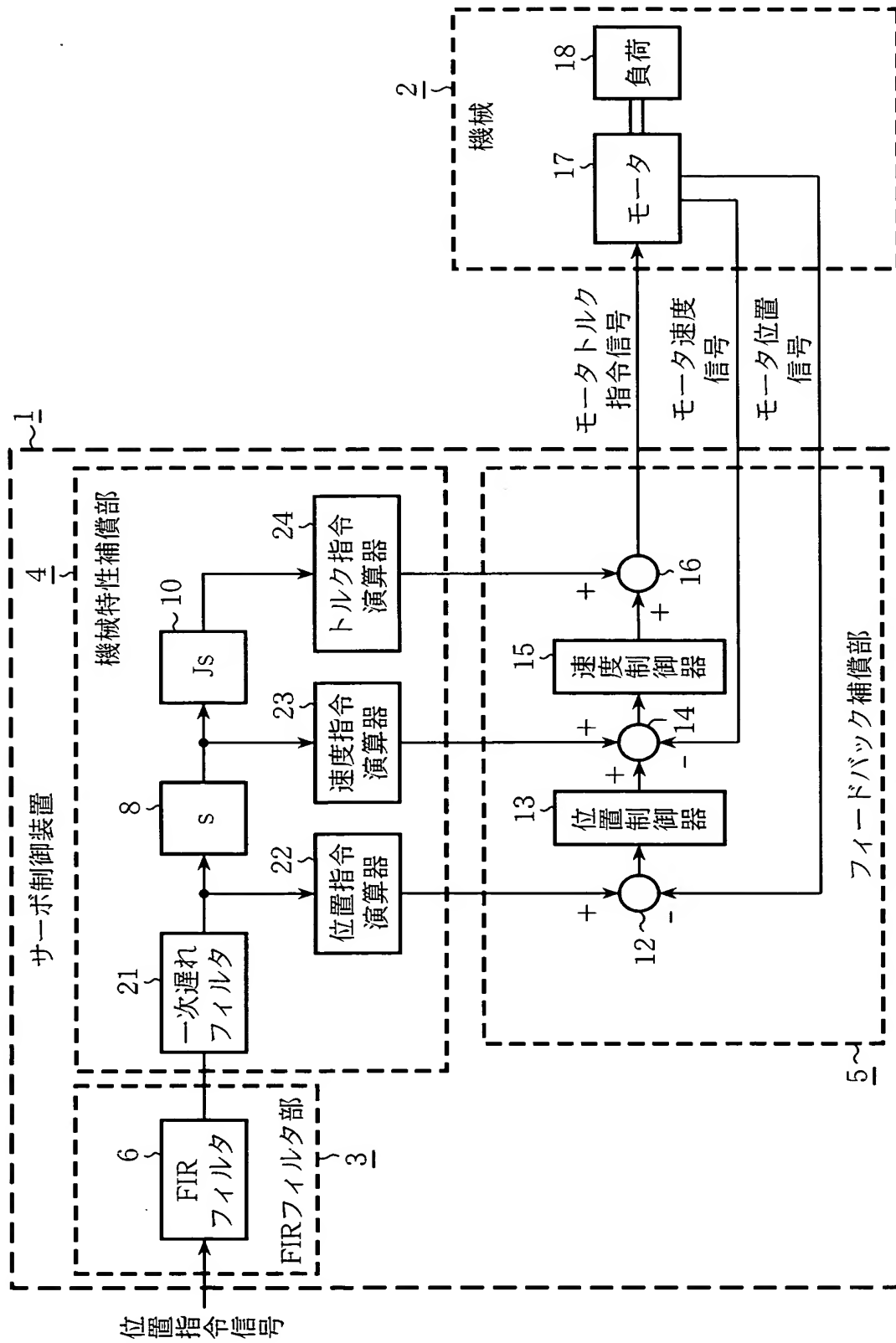
【図 3】



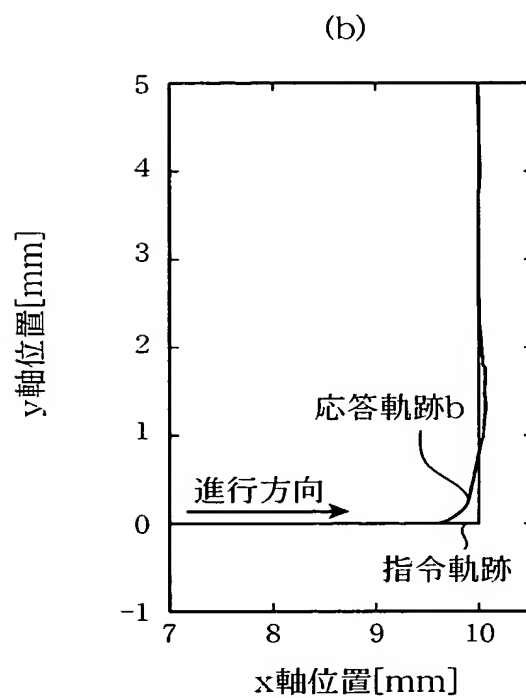
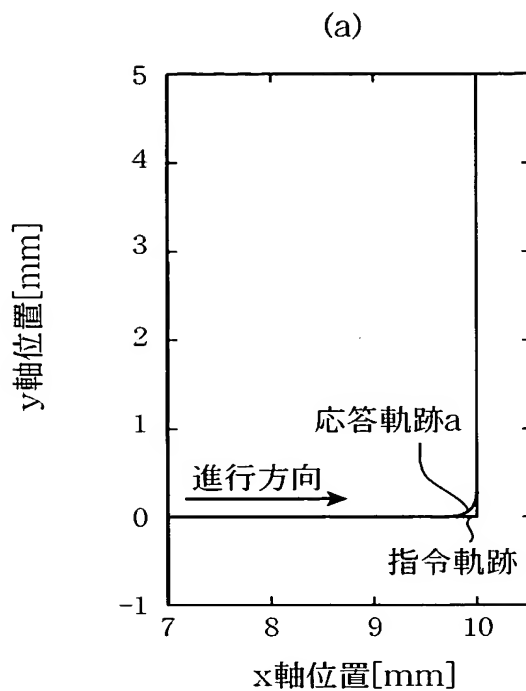
【図 4】



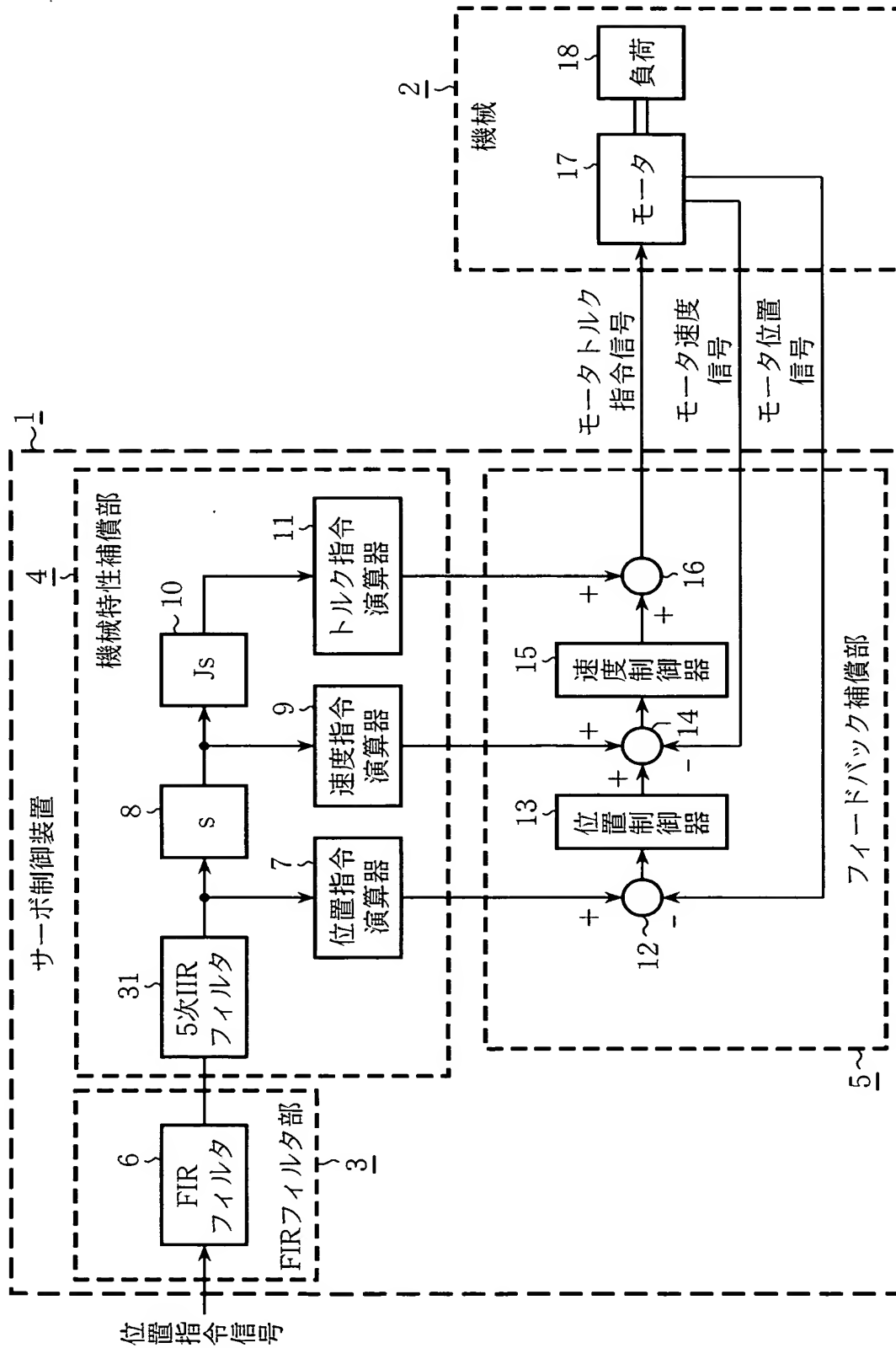
【図 5】



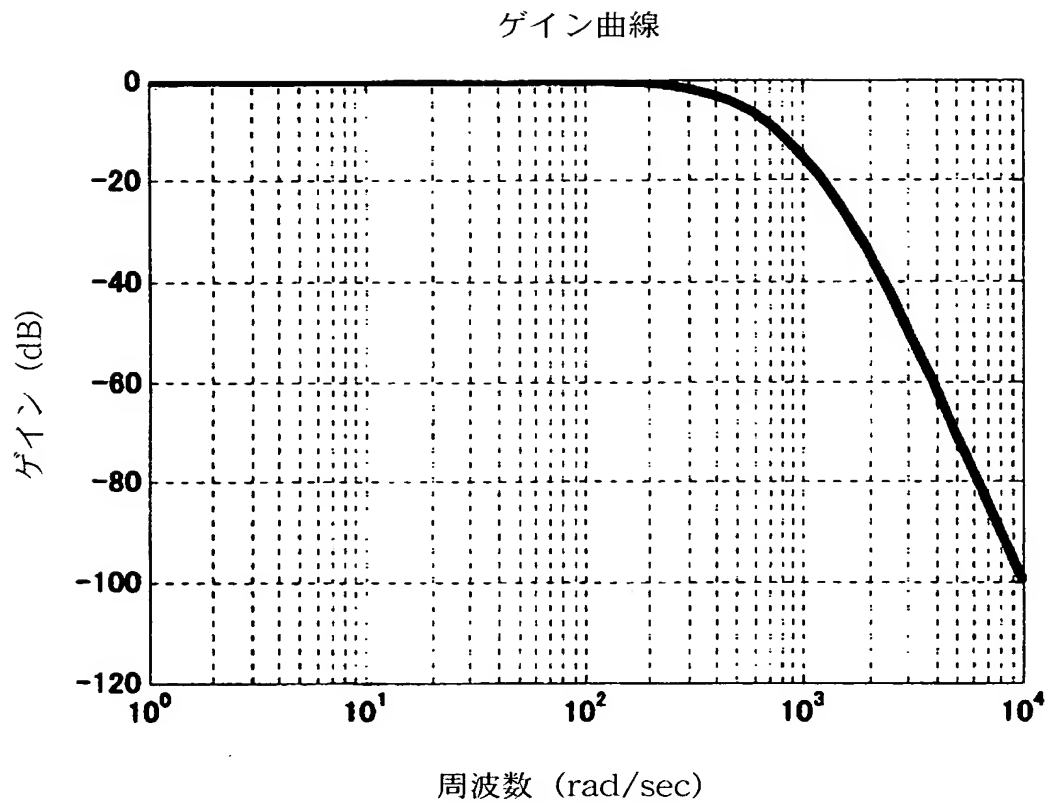
【図 6】



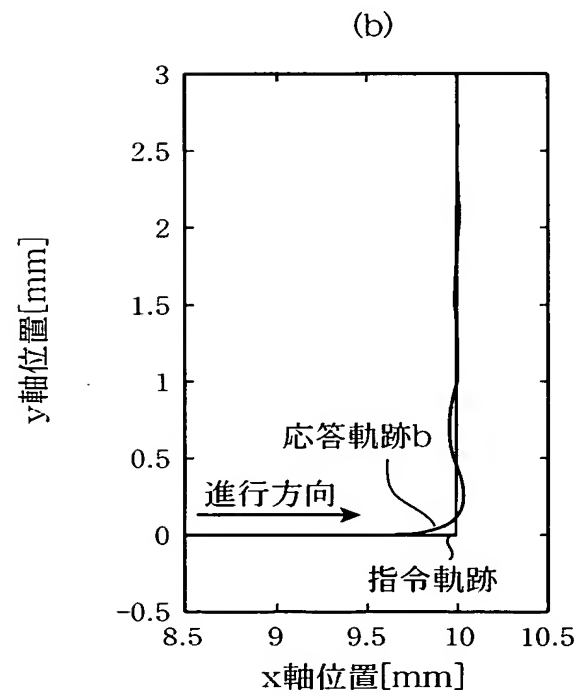
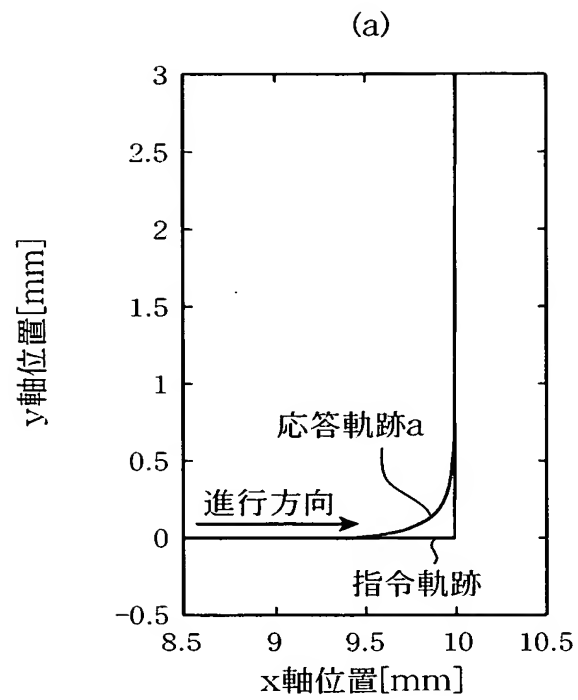
【図 7】



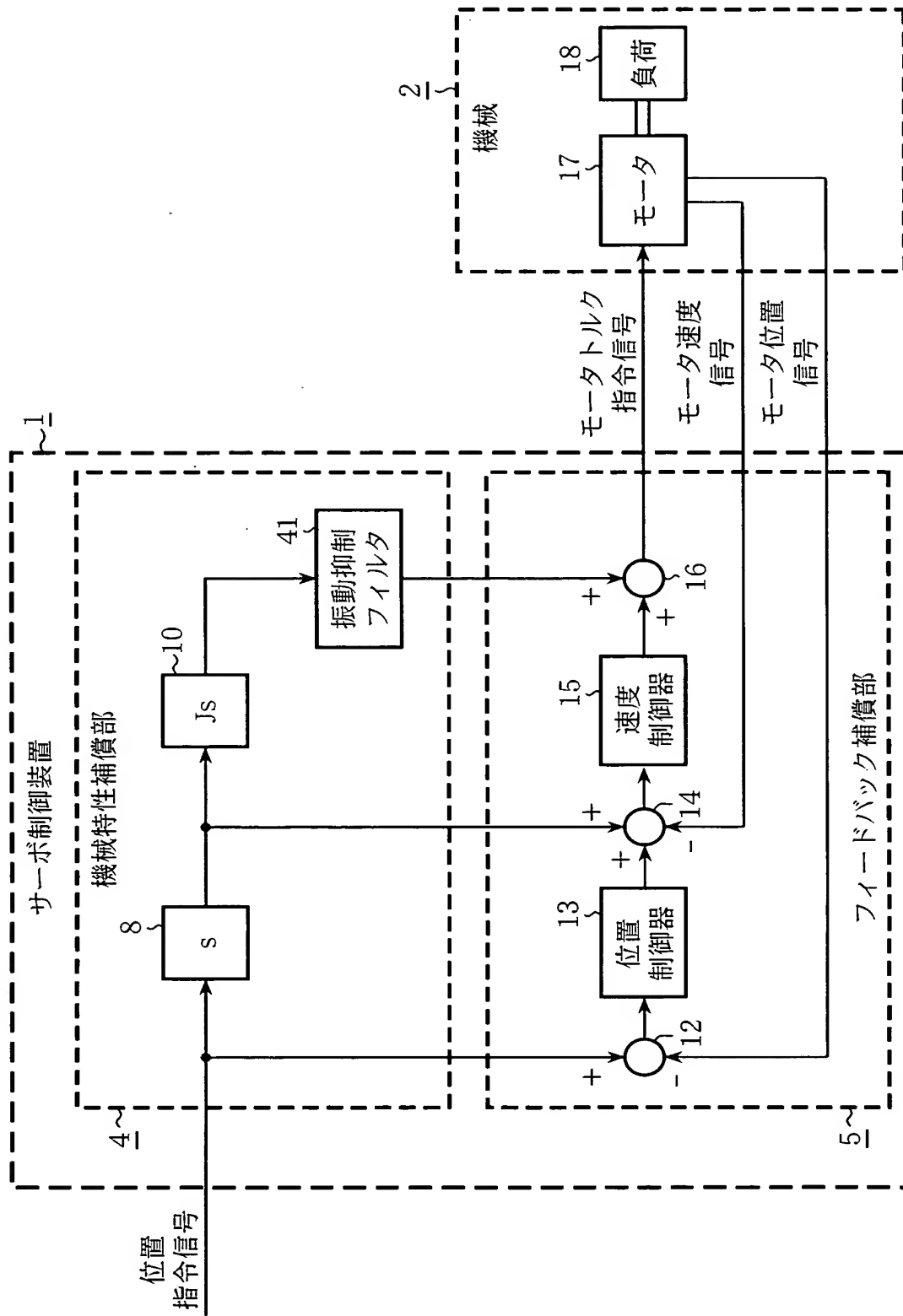
【図 8】



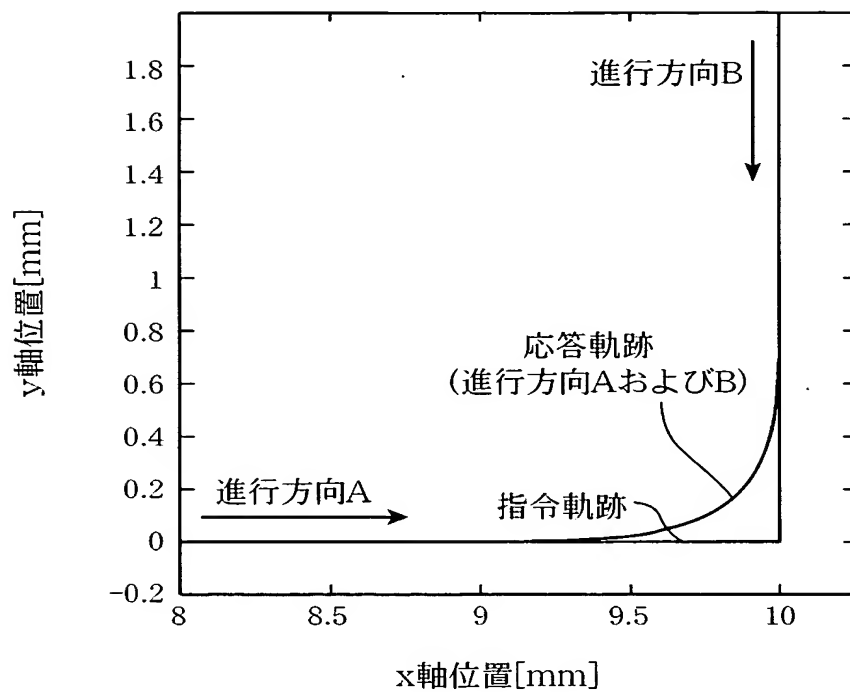
【図 9】



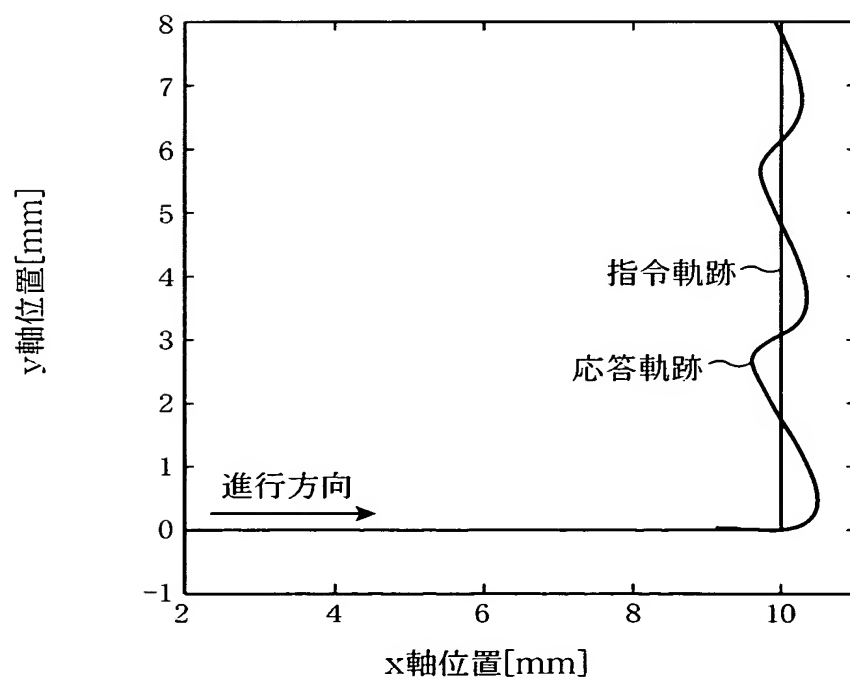
【図 10】



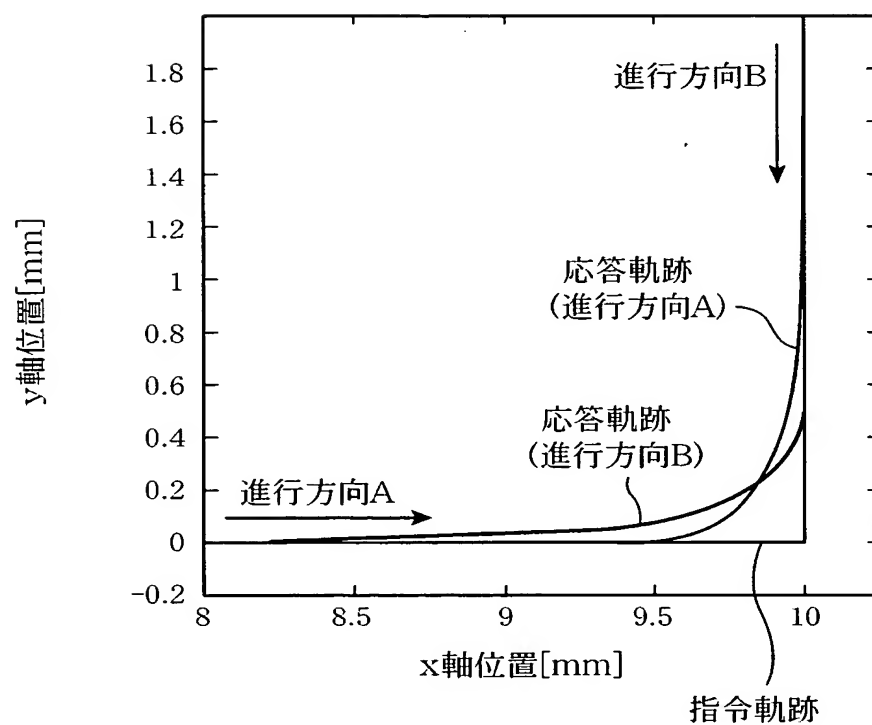
【図 1 1】



【図 1 2】



【図 13】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 機械特性に起因する振動を低減すると共に、往復時の軌跡を一致させるサーボ制御装置を得る。

【解決手段】 F I R フィルタ部 3 により補正された位置指令信号から、機械 2 の特性に対応した所定の周波数成分を減衰して、位置、速度およびトルクの各フィードフォワード信号を演算する機械特性補償部 4 と、位置、速度およびトルクの各フィードフォワード信号に応じて機械 2 を駆動するフィードバック補償部 5 とを備えた。機械特性補償部 4 により、位置指令信号から機械 2 の特性に対応した所定の周波数成分を減衰して、位置、速度およびトルクの各フィードフォワード信号を演算することから、機械 2 の特性に起因する振動を低減することができる。また、F I R フィルタ部 3 により、軌跡を容易に対称な形にして、往復時の軌跡を一致させることができるため、往復加工を行う場合でも段差のない加工面を得ることができる。

【選択図】 図 1

特願 2 0 0 3 - 0 4 2 9 1 6

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [0 0 0 0 0 6 0 1 3]

1. 変更年月日	1 9 9 0 年 8 月 2 4 日
[変更理由]	新規登録
住 所	東京都千代田区丸の内 2 丁目 2 番 3 号
氏 名	三菱電機株式会社